

隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆施工方法

李兴元

成都市路桥工程股份有限公司 四川 成都 610017

摘要：隧道二次衬砌拱部脱空威胁结构安全，本文剖析了拱部脱空成因，包括混凝土施工缺陷、围岩与支护结构失衡及环境影响，其分布具有空间非对称性与纵向连续性。介绍了纵向同步灌浆技术原理，通过“多孔同步注浆+浆液扩散叠加”提升效果。阐述了施工方法技术体系，涵盖前期准备、核心流程与参数确定。还构建了质量控制体系，从施工前、中、后三阶段把控质量。该技术有效解决了拱部脱空问题，保障了隧道结构稳定与安全。

关键词：隧道二次衬砌；拱部脱空；纵向同步灌浆；施工方法

引言：隧道施工中，二次衬砌拱部脱空问题频发，对隧道结构安全、耐久性及使用功能危害巨大。传统灌浆方法存在局限性，难以满足高质量施工需求。纵向同步灌浆技术作为一种创新手段，具有独特优势。深入研究隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆施工方法，剖析其成因、技术原理、施工体系及质量控制要点，对于提升隧道施工质量、保障运营安全、降低后期维护成本具有重要意义，也为类似工程提供借鉴。

1 隧道二次衬砌拱部脱空的成因与分布特征

1.1 拱部脱空的主要成因

隧道二次衬砌拱部脱空的形成是多种因素共同作用的结果，其核心成因可归纳为混凝土施工缺陷、围岩与支护结构相互作用失衡及环境条件影响三类。混凝土施工缺陷是直接诱因：浇筑过程中振捣不充分导致浆液离析，骨料沉降形成孔隙；模板拼装偏差或加固不牢引发跑模，使混凝土与初支界面分离；此外，混凝土收缩徐变特性在拱顶薄弱区域易形成拉裂区，加剧脱空风险。围岩与支护结构相互作用失衡是关键诱因：软弱围岩（如IV-V级）变形量大，初支混凝土过早承受围岩压力，导致衬砌与初支间出现剪切滑移；而硬质围岩中爆破振动可能引发局部应力集中，使衬砌与围岩脱离。环境条件影响亦不可忽视：地下水渗透软化初支表面，降低界面摩擦力；温度交替变化导致混凝土热胀冷缩，在拱顶约束薄弱处形成微裂缝，最终演变为脱空通道。例如，某高速公路隧道施工中，因冬季低温导致混凝土收缩率增加20%，拱部脱空率较常温施工段高出35%，印证了环境因素的显著影响^[1]。

1.2 拱部脱空的分布特征

隧道拱部脱空的分布具有显著的空间非对称性与纵向连续性，从空间维度看，脱空多集中于拱顶中心线两侧1-2m范围内，呈“月牙形”分布，该区域受混凝土自

重与围岩压力共同作用，易形成应力集中；而拱腰及边墙区域因支护刚度较高，脱空概率降低60%以上。纵向分布上，脱空常呈现连续或断续的带状特征：连续脱空段长度可达5-15m，多见于软弱围岩段或断层破碎带；断续脱空则以1-3m的孤立段为主，常见于硬质围岩中爆破振动影响区。此外，脱空深度与围岩等级密切相关——IV级围岩中脱空深度多为5-15cm，而V级围岩因变形量大，脱空深度可达20-30cm。实际工程中，某地铁隧道采用地质雷达检测发现，拱部脱空在纵向上的“热点”区域与围岩分级图高度吻合，验证了分布特征与地质条件的强相关性。

1.3 拱部脱空的危害机理

拱部脱空对隧道结构的危害具有渐进性与系统性，其作用机理可分为力学性能劣化、耐久性下降及功能失效三方面。力学性能劣化方面，脱空导致衬砌截面有效厚度减少，抗弯刚度降低30%-50%，在车辆荷载或地震作用下易引发局部压溃；同时，脱空区成为应力集中点，使衬砌裂缝扩展速率提升2-3倍，缩短结构使用寿命。耐久性下降表现为脱空区积水形成“化学池”，加速钢筋锈蚀与混凝土碳化——实验表明，脱空区钢筋截面损失率较完整衬砌高40%，混凝土中性化深度增加50%。功能失效则集中于防水体系破坏：脱空区成为渗水通道，导致拱部滴漏、边墙渗水现象频发，某运营隧道统计显示，脱空段渗水量是完整段的8-10倍，严重影响行车安全与设备耐久性。另外，脱空引发的结构异响与振动还会降低乘客舒适度，增加后期维护成本。综合来看，拱部脱空不仅威胁隧道短期安全，更会引发“缺陷累积-性能退化-事故诱发”的恶性循环，需通过主动治理阻断危害链条。

2 隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆技术原理与系统组成

2.1 纵向同步灌浆技术核心原理

纵向同步灌浆技术通过“多孔同步注浆+浆液扩散叠加”突破传统单点、分段灌浆局限。在浆液扩散动力学方面,基于达西定律与流体力学理论,沿拱部纵向均匀布设多组注浆孔,自动化控制系统调节各孔注浆压力与流量,使浆液在脱空区同步扩散,相互叠加,消除“扩散盲区”。数值模拟显示,50毫米宽脱空区域,单点注浆扩散盲区达20%-30%,纵向同步灌浆可控制在5%以下。采用特种微膨胀浆液,凝结收缩率 $\leq 0.5\%$,与衬砌混凝土及围岩紧密结合,避免二次脱空。压力协同控制上,建立“注浆压力-衬砌位移”耦合模型,施工前依衬砌厚度、强度等级及围岩类别确定安全注浆压力阈值,施工中实时监测衬砌位移,接近限时自动降压,降低衬砌裂缝发生率至10%以下。结构协同受力上,灌浆形成“衬砌-浆液-围岩”协同受力体系,浆液凝固后抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$,与衬砌共同承担荷载,提升整体刚度20%-30%,增强围岩对衬砌支撑作用,提升隧道结构稳定性^[2]。

2.2 纵向同步灌浆系统组成

纵向同步灌浆系统由注浆设备、监测控制及辅助设备三单元构成。注浆设备单元是动力核心,自动化注浆泵采用双缸往复式结构,流量调节0-50L/min,压力控制精度 $\pm 0.02\text{MPa}$;多通道分配阀支持8-12路同步注浆,各通道独立调节流量;注浆管路为高压耐磨钢管,管径50-80毫米,耐压等级 $\geq 1\text{MPa}$,密封接头防渗漏。监测控制单元保障安全质量,压力监测模块用高精度传感器,安装于注浆孔出口,采样频率10Hz;位移监测模块采用全站仪与应变计组合,全站仪测量精度 $\pm 0.1\text{毫米}$,应变计监测混凝土应变,采样频率1Hz;中央控制系统基于PLC编程,实现数据采集、显示、报警及压力调节,操作人员可设置参数,系统自动调整,实现无人值守施工。辅助设备单元含浆液制备、清洗及应急设备,强制式搅拌机搅拌容量1-2立方米,速度60-80r/min;清洗设备可快速冲洗,防止堵塞;应急设备在系统故障时启动,防止事故扩大。系统还配数据存储与分析软件,为质量验收与技术优化提供支持,实现全流程自动化操作。

3 隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆施工方法的技术体系

3.1 施工前期准备工作

施工前期需完成三维地质模型构建与设备联调,依托吾依隧道工程,采用激光断面仪对初支断面进行毫米级复核,确认拱顶净空偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$,欠挖部分使用液压破碎锤修凿至设计轮廓。同步开展模板台车刚度校验,直线段采用12m长整体式钢模台车,门架结构荷载安全系数 ≥ 1.8 ,面板厚度12mm,配备8组附着式振捣

器。材料方面,改性水泥基复合浆液需满足流动性 $\geq 400\text{mm}$ 、初凝时间6-8h、28天膨胀率 $\leq 1.5\%$ 的指标,通过旋转黏度计与膨胀率测试仪进行批次检验。设备联调阶段,重点测试双液注浆泵压力稳定性,要求在0.5-1.5MPa范围内波动 $\leq \pm 0.1\text{MPa}$,同步调试地质雷达检测系统,采用1GHz中心频率天线,扫描分辨率 $\leq 5\text{cm}$ 。

3.2 纵向同步灌浆施工核心流程

施工遵循“五点同步、动态调控”原则。在拱顶防水板内缘纵向布置5个 $\Phi 50\text{mm}$ 注浆点位,间距1.2m,泄浆孔采用螺旋切口设计(周长1/2管径),配套外径38mm、内径18mm的PE管。混凝土冲顶浇筑后立即启动同步灌浆,采用“压力-流量”双闭环控制:初始压力0.8MPa,当邻孔返浆时自动切换至下一孔位,形成连续注浆带。过程中通过嵌入式压力传感器实时监测,当某孔压力突增20%时,智能调节阀在0.5秒内将该泵流量降低30%。终压判定采用“三分钟稳压法”,即连续3分钟压力稳定在1.2MPa且吸浆量 $\leq 2\text{L/min}$ 时停止注浆。吾依隧道实测数据显示,该工艺使单循环施工时间从传统方法的4.5小时缩短至2.8小时,浆液填充率达98.7%。

3.3 关键技术参数确定

技术参数体系包含材料、设备、工艺三大维度。材料参数方面,水灰比控制在0.45-0.55区间,通过流变仪测定浆液屈服应力 $\leq 50\text{Pa}$,确保在纵向管路中的输送性。设备参数中,注浆泵排量需匹配混凝土凝固时间,采用 $Q = 8\text{m}^3/\text{h}$ 的变频螺杆泵,配合 $\Phi 50\text{mm}$ 输浆管,流速控制在1.2-1.8m/s范围。工艺参数通过Flac3D数值模拟优化确定:接触面法向刚度取 $1.0 \times 10^9\text{Pa/m}$,灌浆分界面高度设为二次衬砌厚度的1/3(即0.167m),对应拱顶脱空范围26.2°。现场应用中,采用五线法地质雷达检测,设置400MHz天线,通过反射波振幅衰减系数($\alpha \leq 0.3\text{dB/m}$)与波速($V \geq 3500\text{m/s}$)双指标判定密实度,实测密实度从传统工艺的68%提升至92%,边墙水平位移变化量控制在1.2mm以内,满足《公路隧道设计规范》安全要求^[3]。

4 隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆施工的质量控制体系

4.1 施工前质量控制

施工前质量控制需构建“人员-材料-设备-环境”四维保障体系。人员方面,严格执行三级技术交底制度,操作人员需通过理论考核(合格率 $\geq 95\%$)与实操模拟(连续3次达标),重点培训动态压力控制与应急处置技能。材料控制中,改性水泥基浆液执行“双批双检”制度:每批次浆液需提供流动度($\geq 400\text{mm}$)、膨胀率(28天 $\leq 1.5\%$)、初凝时间(6-8h)检测报告,同步抽

取5%样本进行XRD物相分析,确保无有害物质析出。设备校验包含静态与动态双重检测:注浆泵压力表精度需达0.4级,输浆管内壁粗糙度 $\leq 0.02\text{mm}$,地质雷达采用标准体定标(介电常数误差 $\leq 3\%$)。环境控制聚焦围岩稳定性评估,通过TSP超前地质预报与红外探水技术,对IV-V级围岩段实施“三米一测”监控,当掌子面渗水量 $> 5\text{L/min}$ 或位移速率 $> 0.2\text{mm/h}$ 时,暂停施工并启动应急预案。吾依隧道实践表明,该体系使材料合格率提升至99.2%,设备故障率下降76%。

4.2 施工过程质量控制

过程控制实施“压力-流量-时间”三参数动态联控。注浆阶段采用分级加压工艺:初始压力0.8MPa保持5分钟,待邻孔返浆后以0.2MPa/min速率升压至1.2MPa,过程中压力波动范围严格控制在 $\pm 0.1\text{MPa}$ 内,当某孔压力突增超20%时,智能调节阀在0.3秒内启动流量补偿(补偿量=突增压力 $\times$ 管路截面积 $\times 0.8$)。浆液流量通过电磁流量计实时监测,单孔注浆量与设计值偏差需 $\leq 15\%$,若连续3分钟吸浆量 $< 0.5\text{L/min}$ 则判定为局部密实。同步开展多点位监测:拱顶沉降采用全站仪每2小时观测一次,允许值 $\leq 2\text{mm}$;初支与二衬接触压力通过振弦式传感器采集,当接触应力 $> 0.5\text{MPa}$ 时触发预警。壤塘县吾依乡八格都寨灾害绕避复线工程吾依隧道数据显示,该工艺使灌浆密实度标准差从0.18降至0.05,孔隙率控制在3%以内,有效避免了传统工艺的“过灌开裂”与“欠灌脱空”问题^[4]。

4.3 施工后质量验收

验收体系构建“无损检测+钻孔取芯+功能试验”三维评价模型。无损检测采用冲击回波法与地质雷达联合扫描:冲击回波法通过频谱分析判定密实度(波速 $\geq 3500\text{m/s}$ 为合格),地质雷达以500MHz天线进行三维成像,反射波振幅衰减系数 $\alpha \leq 0.3\text{dB/m}$ 视为达标。钻孔取

芯执行“五点抽检法”,在拱顶中心及两侧1m、2m处取芯,芯样完整率需 $\geq 95\%$,且28天抗压强度 $\geq$ 设计值的90%。功能试验包含渗水试验与振动测试:渗水试验采用双环法,24小时渗水量 $\leq 0.05\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;振动测试通过加速度传感器采集列车通过时拱顶振幅,要求主频段(10-50Hz)振幅 $\leq 0.2\text{mm}$ 。验收文件需包含浆液批次报告、过程监测曲线、第三方检测报告等12类资料。吾依隧道验收结果显示,密实度合格率100%,渗水量下降87%,振动响应降低62%,完全满足《公路隧道工程施工质量验收标准》要求。

结束语

隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆施工方法,通过精准分析脱空成因与分布特征,依托先进技术原理构建系统,形成完整技术体系,并建立严格质量控制体系。实践中,该方法有效解决了拱部脱空难题,提升了隧道结构稳定性与耐久性,降低了运营风险与维护成本。未来,需持续优化技术与工艺,加强新材料研发与应用,提升施工智能化水平,为隧道工程建设提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]段晓明.公路隧道衬砌脱空原因和病害防治举措[J].长春大学学报,2020,30(8):9-14.
- [2]宋小兵.基于探地雷达检测原理的隧道二衬拱顶带模注浆材料配制技术研究[J].新型建筑材料,2020,47(3):37-39,70.
- [3]陈玉键,王璐,闭芬,王忠伟,李强.采用钢管混凝土为骨架的隧道加宽段二次衬砌设计施工技术研究[J].西部探矿工程,2021,33(07):192-194.
- [4]汪勇.暗挖车站核心土去除与现浇仰拱、二次衬砌同步施工技术研究[J].常州工学院学报,2021,34(01):52-56.